

Slide 2

右のグラフは、縦軸が応力比（応力を静的強度で除したもの）、横軸がひずみで、圧縮力を受けるコンクリートの典型的な応力-ひずみ挙動である。点線(S2)は静的載荷（一方向のみに載荷）で、良く知られているコンクリートの応力-ひずみ曲線である。一方、実線(F2)は疲労載荷で、図中の数字(100, 100,000, 1,000,000, 1,276,400)回目の載荷を行った際の応力-ひずみ関係のみを抜き出して描いている。このように、コンクリートは疲労による載荷の繰返しに伴って、ひずみが徐々に増加し、除荷剛性（応力-ひずみ曲線の勾配≒硬さ）が低下していくことが知られている。一方、一般的に鋼材は、巨視的なひずみや剛性は、疲労荷重を受けるプロセスで、ほとんど変化しない。これは、疲労による鋼材の損傷（亀裂）は、非常に局部的に発生するためと考えられている。

The vertical axis and lateral axis of the right graph are stress ratio (stress divided by static strength) and strain. This is a typical stress-strain behavior of concrete under compression fatigue. The dot line (S2) is a stress-strain curve under static loading (just a monotonical loading) known as a typical stress-strain curve of concrete, while the solid line (F2) is that under fatigue loading where only the stress-strain relationships in certain number of loading cycles represented by the numbers in the graph (100, 100,000, 1,000,000 and 1,276,400) are shown. As seen in this graph, strain and unloading stiffness (slope of the stress-strain curves) of concrete increases and reduces according to the number of fatigue loading cycles. On the other hand, in general, macroscopic strain and stiffness of steels do not significantly change in the process of fatigue. This is because damage (cracks) in steel induced by fatigue is quite local.

Slide 3

式(1)は、「疲労載荷の繰返し数に伴う亀裂の進展速度(=da/dN)」を予測する式である。式(2)は弾性理論から導かれる式であり、応力拡大係数 ΔK は、亀裂先端の応力が局部的に増大する現象（右下の図を参照。横軸が位置で、原点が亀裂先端。縦軸の応力が二次関数的に増加しているのがわかる。応力集中とも呼ばれる。）を表すものである。

「応力振幅」で表される意味：応力振幅は、上限応力と下限応力の差である（Slide 2 の右のグラフを参照）。下限応力がゼロにならないケースも多く存在する。たとえば、死荷重（自重など）の影響である。桁などの構造物には、活荷重（車両などの重量）が作用していなくても、自重や付帯物（舗装やガードレールなど）の重量が死荷重として作用し続けている。通常は、この死荷重が疲労の下限応力にあたる。上限応力だけでなく、下限応力も疲労に影響を与えることが知られており、下限応力が小さいほど（=応力振幅が大きいほど）疲労寿命が短くなる。このため、鋼は応力振幅で疲労寿命を表すことが多い。

Eq. (1) is a predictive equation for progress ratio of cracks according to the number of fatigue loading cycles (=da/dN). Eq. (2) is derived from the elastic theory. The stress intensity factor,

ΔK represents the phenomenon that stress is locally increased as shown in the lower right figure (The lateral axis is the position and its origin corresponds to the tip of a crack. The stress in the vertical axis rapidly increases near the tip of crack. It is also called *stress concentration*.)

Why is it expressed by stress range?

Stress range is the difference between upper stress and lower stress (see the right figure in Slide 2). In real, there are several cases that lower stress is not zero such as the effect of dead loads (e.g. self-weight). Even though live loads by vehicle weight, etc. are not applied to the structure, self-weight and weight of non-structural members such as bridge railing and pavements are continuously acted as dead loads. In general, lower stress is determined by dead loads. It is known that not only upper stress but also lower stress has an influence on the fatigue behavior. Smaller lower stress (= bigger stress range) is, shorter fatigue life is. Therefore, fatigue life of steels often expressed by stress range.

Slide 5

S-N 線図は、応力比や応力振幅を変えた複数の疲労実験を行うことで得ることができる。たとえば、(1)上限応力 80%、下限応力 20%の条件で疲労実験を行い、10,000 回目の载荷で疲労破壊が生じたとすると、S-N 線図の縦軸が 0.8、横軸が 10,000 の位置に点をプロットすることができる。さらに、下限応力が同じ 20%である他の条件として、(2)上限応力 70%、下限応力 20%、(3)上限応力 60%、下限応力 20%の実験を行い、(2)が 100,000 回目、(3)が 1,000,000 回目で疲労破壊したとすると、計 3 つの点を S-N 線図にプロットすることができる。これらのプロットを直線で近似することで、下限応力が 20%の場合の疲労強度式を得ることができる。(実際には 3 つではなく、もっと多くの実験データから回帰式を得る。) 図からわかるように、水中に設置されたコンクリートは気中よりも疲労寿命が短くなることが知られている。疲労だけでなく、他の劣化現象に関しても、水の存在がコンクリートの長期的な性能に影響する。

S-N diagram can be obtained from experiments in which stress ratio and stress range are changed. For example, if we conduct a fatigue loading test with (1) 80% of upper stress ratio and 20% of lower stress ratio and the specimen is failed at 10,000 cycles of fatigue loading, the result can be plotted at the point of 80% in the vertical axis and 10,000 in the lateral axis of the S-N diagram. As the other cases with the same lower stress of 20%, if we conduct (2) 70% of upper stress ratio and 20% of lower stress ratio and (3) 60% of upper stress ratio and 20% of lower stress ratio and the specimens are failed at 100,000 and 1,000,000 cycles of fatigue loading, respectively, three points can be plotted in the S-N diagram in total. Then, from a linear approximation of those three plots, we can obtain the fatigue strength equation for 20% lower stress. (In real, the approximation equation is obtained from huge number of

data much larger than three.)

As seen in the figure, it is known that fatigue life of concrete in water is shorter than that in air. Presence of water on surfaces of concrete affects its long-term performance under not only fatigue but also other deterioration factors.

Slide 7

鋼構造は基本的に 1 本の亀裂しか進展しないため、構造物全体の变形や剛性はほとんど変わらない。したがって、点検などで、その亀裂を見つけられないと、構造物が突如崩壊したように見える。一方、コンクリート構造物は複数のひび割れが進展し、次スライドに示すような他の変状も併発するため、損傷の進行を目で発見しやすい。ただし、近年、アスファルト舗装に覆われたコンクリート床版の上面が劣化していて、発見が遅れたケースもあることから、油断は禁物である。

In the case of steel structures, overall behaviors such as deflection and stiffness does not change significantly because only one crack is propagated. Therefore, if the crack is not found in the inspection, it looks that the structure is suddenly collapsed. On the other hand, in the case of concrete structures, damage progress is easier to be found because a number of cracks are propagated and other appearance as shown in the next slide also occur. However, there is a recent report that finding of damage on the top surface of concrete slabs was delayed because it is hidden by asphalt pavements.

Slide 8

押抜きせん断破壊とは、床版で生じるせん断破壊の一種で、荷重が作用した箇所が面外方向にコーン状に押し抜かれることで破壊する現象である。

Punching shear failure is a type of shear failure of slabs. It occurs when the location where a load is applied is pushed out in a cone shape in the out-of-direction of the slab.